

Title	Material removal sequence optimization for reducing workpiece deformation during thin-wall machining(Abstract_要旨)
Author(s)	Wang, Jun
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2020-03-23
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k22438
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士（工学）	氏名	王 俊
論文題目	Material removal sequence optimization for reducing workpiece deformation during thin-wall machining （薄壁加工の工作物変形を抑制するための材料除去順序の最適化）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>航空機の燃費向上のためジェットエンジンの軽量化や高効率化が求められ、タービンブレードやケーシングといった構成部品の耐熱性向上と軽量化が進んでいる。耐熱性向上のために部品材料に耐熱合金が用いられ、除去単位当たりの切削抵抗が大きくなるとともに、軽量化のために部品が薄肉化されて構造自体が変形しやすくなり、切削加工条件の最適化が難しくなっている。本論文は、この問題を解決するために、薄壁部品の加工誤差を最小化し加工能率を最大化するエンドミル加工プロセスの設計について検討し、設計に必要な力学モデルと加工順を決定するアルゴリズムを考案して、実際の加工実験でその効果を検証した結果についてまとめたものであり、全 6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、薄壁加工技術に関する過去の研究について調査し、その体系を整理した結果について述べている。薄壁加工における上記の問題を解決するために用いられている、支持具やダンパで工作物を補助する方法や、複数主軸によって同時切削する方法は設備コストを増大させるという問題がある。そのため、工作物の剛性が低下しない加工順を決定するアルゴリズムが研究されてきた。しかし、この方法では、1)最終精度が保証できない点、2)加工パスを生成できる加工順が必ずしも得られない点、3)取り代が小さい場合に有効ではない点を指摘し、これらを解決することを本研究の目的とすることを述べている。</p> <p>第 2 章では、工作物の変形を予測するためのエンドミル加工の力学モデルの構築について述べている。エンドミルの切刃が材料に干渉する際の切り屑形状の変化について考察し、切り屑厚さから切削抵抗を導出し、切込みが小さいという仮定をおいて近似式を求めている。工具径方向と軸方向切込みを変化させる加工実験を行い、近似式のパラメータを同定して、構築したモデルが十分な予測精度を持つことを示している。</p> <p>第 3 章では、切削抵抗が作用した際の工作物変形量を正確に予想するための計算アルゴリズムを検討している。工作物の変形により切込み量が低減すると実際の変形量も減少するが、薄壁の厚さが減少するとこの影響が顕著になる。この影響を考慮するために、切削抵抗モデルから得た切削力を用いた繰り返し計算で変形量を予想する方法を提案し、その結果を立壁加工の厚さを減少させる実験で確認した。</p> <p>第 4 章では、薄壁の除去部分をブロックに分割し、各ブロック加工時の工作物変形量を指定した値以下にする制約を課して加工順を決定する方法について検討している。過去の研究では工作物変形を最小にするアルゴリズムが提案されていたが、この方法では最終的な変形量（加工誤差）が制御できない。この問題を解決するために、ブロック除去での変形制約（限界変形量）を設定して加工順を決定するアルゴリズムを構築した。具体的には、加工の各段階で、加工可能なブロックの集合からモデルを用いて予想した変形量が限界変形量を超えないように選択する。そして、アルゴリズムで決定した加工順で実際に加工した薄壁の加工誤差を機上測定装置で測定し、限界変形量以下になって</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	王 俊
<p>いることを示した。また、実験において表面あらかさが悪化するケースに着目し、その原因が、工具がブロック除去のために切込み方向に動作することでびびり振動が発生したためと考察している。</p> <p>第5章では、第4章で示したアルゴリズムを加工精度と加工能率の点から改善する方法を検討している。まず、表面あらかさの悪化の原因となったびびり振動対策のために、加工進行中の工具の半径方向への動作を抑制する方法を提案した。また、各ブロックの切削において工作物の変形量に余裕がないブロックは分割して精度を保証し、余裕があるブロックは統合して能率を向上することも可能にした。</p> <p>改良したアルゴリズムで得られた加工順と、従来から経験的に用いられている加工順（上端から最終仕上げを進行させる）、ならびに改良前のアルゴリズムで得られた加工順で加工を行い、加工精度（厚さ誤差、びびり振動、うねり）と加工時間で比較した。その結果、改良された加工結果は、改良前より加工時間が25%短縮でき、厚さ誤差を75%低減できるなど加工精度の点でも優れていることを示した。また、従来の加工との比較では、加工時間は同等であるが、加工精度の点で優れており、特に厚さ誤差を80%に低減できることを示した。</p> <p>第6章は以上をまとめた結言であり、本研究を利用することで、従来経験的に行われてきた加工順の決定がシステマテックに行えることを述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、薄壁部品の加工誤差を最小化し加工能率を最大化するエンドミル加工プロセスの設計について検討し、設計に必要な力学モデルと加工順を決定するアルゴリズムを考案して、実際の加工実験でその効果を検証した結果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 従来のエンドミル加工の力学モデルを再検討し、薄壁加工で利用できる切削抵抗予測式を構築している。切り屑形状の変化について考察し、切り屑厚さから切削抵抗を導出し、切込みが小さいという仮定をおいて予測式を求めている。また、工具径方向と軸方向切込みを変化させる実験を行い、予測式が十分な予測精度を持つことを示している。
2. 切削抵抗が作用した際の工作物変形量を正確に予想するための計算アルゴリズムを検討している。工作物の変形により切込み量が低減することで実際の変形量も減少するが、繰り返し計算によって実際の変形量を予想し、実験で検証している。
3. 薄壁の除去部分をブロックに分割し、各ブロック加工時の工作物変形量を指定した値以下にする制約を課して、ブロックの除去順を決定する方法について検討している。過去の研究では工作物の変形を最小にするアルゴリズムが提案されていたが、このアルゴリズムでは最終的な変形量（加工誤差）が制御できない。この問題を解決するために、ブロック除去での変形制約を考慮して加工順を決定するアルゴリズムを構築し、アルゴリズムにより決定した加工順で実際に加工した薄壁の加工誤差が指定値以下になっていることを示した。
4. 上記のアルゴリズムで得られた加工順で生じる問題の解決法について検討している。びびり振動発生抑制に関しては、加工中の工具の半径方向の移動を抑制する解決法を考案した。加工能率の向上に関しては、各ブロックの切削において制約を満足しない場合はブロックの分割を行い、余裕のある場合はブロックを統合して同時に除去する解決法を考案した。改良前のアルゴリズムによる加工順と改良後のアルゴリズムによる加工順を比較して、加工時間が 25%短縮できることを示した。また、従来から用いられていた加工順に対して、改良後のアルゴリズムによる加工順では加工精度が向上することを示した。

以上、本論文は、薄壁加工の加工誤差を最小化し加工能率を最大化する方法を体系的に研究してその効果を示したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 2 月 17 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。